

煤矿井下供电系统无功补偿技术应用与节能分析

王云

宁夏王洼煤业有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i1.22228

[摘要] 煤矿井下多数供电设备都属于感性负荷,设备长期持续运转,容易造成电网无功失衡,会出现功率因数不足、线路能耗增大、供电效率变差等问题,影响井下供电稳定与电能利用效率。文章依托井下供电运行特点,梳理各类无功补偿技术的应用特点与节能原理,总结现存问题并给出优化方式,可为井下供电节能改造提供参考。

[关键词] 煤矿井下; 供电系统; 无功补偿; 功率因数; 节能降耗

中图分类号: TD68 **文献标识码:** A

Application of Reactive Power Compensation Technology and Energy-Saving Analysis in Underground Coal Mine Power Supply Systems

Yun Wang

Ningxia Wangwa Coal Industry Co., Ltd.

[Abstract] Most power supply equipment in underground coal mines consists of inductive loads. Their long-term continuous operation can easily cause reactive power imbalance in the power grid, resulting in insufficient power factor, increased line energy consumption, and reduced power supply efficiency, thereby affecting the stability of underground power supply and the efficiency of electrical energy utilization. Based on the operational characteristics of underground power supply systems, this paper reviews the application characteristics and energy-saving principles of various reactive power compensation technologies, summarizes existing problems, and proposes optimization measures, providing a reference for energy-saving upgrades of underground power supply systems.

[Key words] underground coal mines; power supply system; reactive power compensation; power factor; energy conservation and consumption reduction

引言

煤矿井下机械化、自动化生产设备的普及,让掘进机、输送设备、水泵等大功率感性负荷装机总量持续增加,井下供电系统的无功占比也随之升高;无功冗余会加大线路压降、升高设备运行温度,造成电能浪费,还会缩减电气设备的使用年限。受井下特殊工况限制,普通供电优化方式收效有限,无功补偿可有效改善供电能效,本文针对各类补偿技术的井下适配效果与节能机理展开分析。

1 煤矿井下供电系统无功损耗成因及节能必要性

煤矿井下供电系统产生的无功损耗,大多来自井下感性用电设备与供电线路的自身电气属性,这也是造成整体供电能效偏低的主要原因。井下生产设备大多依靠异步电机驱动,设备工作过程中需要消耗一定的无功功率维持运转,频繁的设备启停与不稳定的负荷变化,也会进一步加重无功供需不匹配的情况;较长的井下供电线路、受限的线缆规格以及多级变压器的运行

过程,都会持续产生无功消耗,从而形成累积性的系统损耗。无功功率的不平衡状态,会拉低电网功率因数,降低变压器、开关等供电设备的实际利用率,增大线路输电损耗,同时引发电压波动等问题,影响电气设备稳定运行,加快设备老化速度。因此,合理运用无功补偿技术,能够有效调节系统无功平衡,减少电能损耗,对优化井下供电体系、提升生产能效有着重要的实际作用^[1]。

2 煤矿井下主流无功补偿技术类型及适配特性

2.1 固定电容器无功补偿技术

固定电容器补偿是最为基础、应用较为广泛的静态无功补偿方式,核心依托并联固定容量的电力电容器,为井下供电系统提供恒定容性无功,抵消设备运行产生的感性无功。该技术装置结构简单、体积小巧、运维便捷,设备购置与运行成本较低,无需复杂控制单元,适配井下简易供电场景。其核心特性为补偿容量固定不变,无法根据井下负荷动态波动调整补偿参数,在设备

满负荷运行时易出现补偿不足,在设备轻载、待机时段易发生过补偿问题,引发系统电压异常升高。整体适配井下负荷稳定、波动幅度小的固定供电支路,适用于小型辅助设备供电系统的基础无功优化,节能效果相对有限,仅能实现基础的无功损耗管控。

2.2 分组投切电容器无功补偿技术

分组投切电容器补偿是在固定补偿基础上优化升级的静态补偿技术,将多组不同容量的电容器模块化组合,依托智能检测单元实时采集供电系统负荷、功率因数、无功功率等运行参数,通过控制单元自动投切不同容量的电容组,实现补偿容量的阶梯式调节。相较于固定补偿方式,该技术可适配井下小幅负荷波动,有效改善单一固定补偿的局限性,规避轻载过补偿、重载欠补偿问题,补偿精度与节能效果显著提升。该装置集成度较高,具备基本的自适应调节能力,运维难度适中,可适配井下综采、掘进等常规生产供电系统,是目前中小型煤矿井下主流的无功补偿方式。但该技术存在投切延时问题,无法响应瞬时、突发性的负荷波动,对高频波动的复杂供电场景适配性不足^[2]。

2.3 静止无功发生器补偿技术

静止无功发生器属于新型动态无功补偿技术,依托电力电子变换器件实现无功功率的连续可调补偿,无需传统电容、电感储能元件,可根据井下供电系统瞬时无功变化,快速输出容性或感性无功,实现无功功率的精准动态平衡。该技术响应速度极快,可毫秒级适配井下设备启停、负荷突变引发的无功波动,能够有效抑制电压波动、闪变等供电问题,稳定系统运行电压。设备结构紧凑、损耗极低、运行稳定性强,具备极强的工况适配能力,可适配大型综采工作面、大功率连续运转设备等复杂供电场景。但其设备造价较高,控制逻辑复杂,对运维人员专业能力要求更高,多用于大型现代化煤矿井下高端供电系统的优化改造。

2.4 有源滤波无功一体化补偿技术

有源滤波无功一体化补偿技术兼顾无功补偿与谐波治理双重功能,是适配井下复杂电磁环境的复合型供电优化技术。井下变频器、软启动器等电力电子设备的广泛应用,会产生大量谐波,谐波会加剧供电系统无功损耗、干扰设备正常运行,常规无功补偿技术仅能补偿无功功率,无法治理谐波污染。该技术可实时检测系统无功分量与谐波分量,同步完成无功补偿和谐波抑制,在优化功率因数、降低能耗的同时,净化电网电能质量,消除谐波引发的附加损耗与设备故障隐患。该技术综合节能与提质效果最优,适配智能化、自动化程度高的现代化煤矿井下供电系统,可全面解决井下无功失衡与电能污染叠加问题。

3 无功补偿技术在煤矿井下供电系统的应用要点与节能机制分析

3.1 差异化补偿方式选型应用

井下无功补偿的节能效果,会直接受到补偿方案选型的影响,根据不同供电区域的设备类型、负荷运行特征与工况变化规律进行针对性配置,能够有效减少选型不合理带来的能效偏低、电网运行不稳定等各类隐患。井下巷道照明、小型水泵、皮带

辅助设备这类供电支路,整体负荷状态相对稳定,波动范围也比较小,可以选用固定电容器补偿方式,该方式能够在控制设备投入和运维成本的基础上,完成基础无功损耗治理,具备不错的实用性与经济性。综采、掘进等常规生产区域的负荷会存在小幅波动,运行状态整体可控,适合采用分组投切电容器补偿技术;该技术依靠阶梯式容量调节方式,适配日常负荷的动态变化,能够优化电网功率因数,减少设备与线路运行过程中产生的无功损耗。大型智能综采区域集中了大量大功率设备,设备启停频次高,瞬时负荷波动剧烈,容易造成无功突变、电压波动等问题,适配选用静止无功发生器,可依靠快速响应能力平衡系统无功,稳定整体供电工况。搭载众多变频设备的智能化矿井,会同时存在无功失衡与谐波污染问题,可采用有源滤波一体化补偿技术,同步完成无功补偿和谐波治理。这种差异化的选型方式,能够适配各类井下供电场景,规避补偿不足或改造冗余的问题,让矿井节能收益与运行成本维持合理的平衡状态^[3]。

3.2 科学布设补偿装置安装位置

补偿装置的安装位置直接决定无功补偿的覆盖范围与损耗治理效果,不合理的布设方式会导致补偿效能流失,无法实现全域节能。井下供电系统采用多级变电、分区供电模式,电能传输层级多、线路分支复杂,无功损耗分布具有分散性、层级性特征,需遵循“就近补偿、分级治理”的核心原则布设补偿装置,最大限度缩短无功电流传输距离,从源头削减线路传输损耗。针对单台大功率掘进机、刮板输送机等独立感性负荷设备,采用单机就地补偿模式,将补偿装置直接安装于设备供电端,就近抵消设备运行产生的感性无功,杜绝无功电流向上级电网扩散,有效减少末端设备至分站线路的无功损耗,节能靶向性极强。

对于井下采区变电所、移动变电站等供电枢纽,承担多支路负荷供电任务,无功损耗累积量大,需采用集中补偿模式,在供电母线处统一布设补偿装置,平衡整个供电分区的无功功率,优化上级供电网络的运行参数,降低变电设备与主干线路的电能损耗。对于长距离巷道供电线路、多设备共用供电支路,采用就地补偿与集中补偿相结合的混合补偿模式,分层治理各级无功损耗,实现全域无死角补偿。合理的位置布设可精准锁定无功损耗核心区域,避免无效补偿、重复补偿,大幅提升电能传输与利用效率,是保障整体节能效果的关键环节。

3.3 补偿容量精准匹配与动态调控

补偿容量的合理匹配与动态调节,是避免电网出现过补偿、欠补偿问题,保障井下供电系统长期稳定节能运行的重要基础。不合理的容量配置会带来各类运行隐患,补偿容量偏大,容易造成电网电压异常抬升,加重电气设备的绝缘负担,产生多余的电能损耗,也会在一定程度上缩减设备使用年限;补偿容量偏小,则无法充分抵消系统中的感性无功,功率因数的改善效果有限,整体节能效益难以达标。容量配置工作开展前,需要收集井下供电系统的峰值负荷、谷值负荷、平均负荷、线路参数以及设备运行时长等基础数据,依托数据核算系统固有无功损耗和动态波动范围,以此划定合理的补偿容量区间。静态补偿系统可以结

合现场负荷的变化规律设置分级容量, 适配日常常规负荷波动; 动态补偿系统可依靠智能调控模块, 实现补偿容量的自动跟随调节, 让系统无功和功率因数始终维持在合理区间。结合设备检修、停产、交接班等轻载工况调整运行策略, 及时删减多余的补偿容量, 能够有效规避轻载工况下的过补偿损耗, 让无功补偿设备长期维持高效运行状态, 充分释放井下供电系统的节能潜力^[4]。

3.4 无功补偿的核心节能作用机制

无功补偿技术的节能核心是通过平衡系统无功供需, 从根源削减各类无效电能损耗, 优化供电系统运行状态, 实现电能利用效率的全方位提升, 其节能作用主要体现在三个核心维度。首先, 大幅降低供电线路有功损耗, 井下线路的有功损耗与无功电流平方呈正相关, 系统无功过剩会增大无功电流, 加剧线路发热损耗, 通过精准补偿抵消感性无功, 可有效减小线路总电流, 降低线缆传输过程中的电能损耗, 减少长期运行的电量流失。其次, 提升供电设备利用效率, 变压器、开关柜等供电设备的额定容量为视在功率, 无功功率占用大量设备容量会导致有功功率输送能力下降, 设备长期低效运行。无功补偿可大幅降低系统无功功率占比, 释放设备额定容量, 提升有功电能输送效率, 让供电设备满负荷、高效率运行, 减少设备容量闲置引发的能效浪费, 同时降低设备运行温升, 减少设备能耗损耗。最后, 优化系统电压质量、降低设备故障损耗, 无功失衡引发的电压偏低、波动过大, 会导致电机类设备运行效率下降、耗电增加, 频繁电压波动还会加剧设备部件损耗, 增加故障停机能耗。稳定的无功平衡可维持电压平稳, 保障设备额定工况运行, 提升设备运行能效, 减少故障附加能耗与运维损耗。

3.5 技术应用优化与节能效果提升策略

井下复杂的作业环境与供电系统运行缺陷, 会在一定程度上制约无功补偿技术的应用效果, 针对这类问题, 可以从设备适配、系统联动、日常运维三个层面做出优化, 以此提升补偿质量与节能成效。在设备适配方面, 补偿装置可以做防爆、防尘、防潮的结构优化, 用来适配井下湿度高、粉尘量大、安装空间有限的恶劣工况, 能够减少环境因素造成的设备运行异常、能效降低

等问题, 保障补偿系统长期平稳运行。同时, 智能化矿井可以为补偿设备加装监测与远程调控模块, 用来实时采集无功功率、功率因数、电能损耗等运行数据, 依托数据完成智能分析与自动调节, 提升设备控制的精准程度。在系统联动方面, 无功补偿设备可以和井下供电监控系统相互融合, 提前预判负荷波动带来的无功变化, 提前调整补偿策略, 改善调控滞后带来的能耗问题; 多支路、多设备的复杂供电区域, 可搭建分区联动补偿模式, 让各区域补偿设备协同工作, 避免局部补偿失衡影响整体供电能效。在运维管控方面, 需要搭建常态化的设备检修机制, 定期检查设备运行状态、校准补偿参数、排查线路隐患, 及时处理电容衰减、控制失灵等常见故障, 缓解设备老化、参数偏移造成的节能效果下滑问题, 稳定维持无功补偿系统的综合运行效能^[5]。

4 结束语

井下供电系统出现的无功失衡问题, 是造成电能浪费、供电质量不佳、设备运行效率偏低的主要原因, 无功补偿也是改善这类问题、实现矿井节能运行的关键技术。文章整理了各类补偿技术的井下适配特点, 归纳出设备选型、布置、参数调控的应用要点, 分析了其节能原理, 该技术的合理应用, 能够优化井下供电工况, 提升矿井供电节能效益。

【参考文献】

- [1]王茂全,王崇强,刘涛.煤矿矿井供电系统无功补偿技术的应用研究[J].内蒙古煤炭经济,2025(3):141-143.
- [2]席云波.矿井供电系统中无功补偿技术的应用研究[J].煤炭新视界,2025(1):258-259.
- [3]洪飞,赵杰.高效节能技术在煤矿供电系统中的应用[J].移动信息,2025,47(8):430-432.
- [4]孙国晨.高压供电系统无功补偿系统在煤矿中的应用研究[J].矿业装备,2025(12):43-45.
- [5]王蔚,陈炳弛.SVG无功补偿装置在唐家会煤矿供电系统中的应用[J].工矿自动化,2025,51(S1):208-210+222.

作者简介:

王云(1982—),男,汉族,宁夏人,本科,工程师,研究方向:电气工程。